Die Intensitätsverhältnisse der mit Röntgenstrahlen erregten Röntgenlinien im L-Gebiet in ihrer Abhängigkeit von der Spannung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Naturwissenschaftlich-Mathematischen

Fakultät

der Albert-Ludwigs-Universität

zu Freiburg i. Br.

verfaßt und vorgelegt

von

HENRY HIRST, B. Sc. (Eng.)

aus Sheffield, England.

1934

Speyer & Kaerner, Univ.-Buchhandlung, Freiburg i. B.

Gedruckt mit Genehmigung der naturwissenschaftl.-mathematischen Fakultät
der Universität Freiburg i. Br.

Dekan:
Prof. Dr. W. Soergel

Referent:
Prof. Dr. G. v. Hevesy

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Druck von A. Bonz' Erben in Stuttgart.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung 5

II. Ziel der vorliegenden Arbeit 7

III. Versuchsanordnung 8

IV. Durchführung des Versuchs 9

V. Versuchsergebnisse 11

a) Wolfram (74) 11

b) Thallium (81) 20

c) Uran (92) 22

VI. Zusammenfassung 23

I. Einleitung.

Über die Intensitätsverhältnisse der Röntgenlinien in der K- und L-Reihe liegt eine große Anzahl von Untersuchungen vor. Bei allen Arbeiten wurden die Linien ausnahmslos mit Kathodenstrahlen erregt. Die ausführlichsten Messungen in der K-Reihe wurden von H. Th. Meyer[1]) und J. H. Williams[2]) ausgeführt. Meyers Ergebnisse sind aus der Tabelle 1 zu ersehen.

Tabelle 1.

Zusammenstellung der Intensitätsverhältnisse der K-Linien.

Element	α_1	α_2	β_1	β_2
49 In	100	51,8	21,7	3,65
48 Cd	100	53,8	26,1	4,18
47 Ag	100	51,7	24,0	4,22
46 Pd	100	52,3	24,8	4,14
45 Rh	100	51,2	25,3	3,97
44 Ru	100	51,1	23,3	3,96
42 Mo	100	50,6	23,3	3,48
41 Nb	100	49,7	21,4	3,32
40 Zr	100	49,1	21,9	3,28
39 Y	100	50,0	23,3	3,19
38 Sr	100	48,6	21,8	2,72
37 Rb	100	49,3	23,0	2,62
35 Br	100	50,9	22,2	1,73
34 Se	100	50,3	21,0	1,07
33 As	100	49,2	21,7	0,69
32 Ge	100	50,7	22,8	0,46
31 Ga	100	50,6	21,6	—
30 Zn	100	48,9	18,5	0,19
29 Cu	100	46,0	15,8	0,15
28 Ni	100	47,6	17,1	0,20
27 Co	100	53,2	19,1	0,23
26 Fe	100	49,1	18,2	0,26
25 Mn	100	54,9	22,4	0,34
24 Cr	100	50,6	21,0	0,66
23 Va	100	52,1	20,5	0,48

[1]) H. Th. Meyer, Wiss. Veröff. aus dem Siemens-Konzern 7, 108, 1929.
[2]) J. H. Williams, Phys. Rev. 44, 146, 1933.

In der Tabelle 2 sind die relativen Intensitäten der L-Linien zusammengestellt. Wie weit die Dorgelosche Intensitätsregel zutrifft, geht aus Tabelle 3 hervor.

Die Abhängigkeit der Linienintensität von der Röhrenspannung bei Anregung mit Kathodenstrahlen bildet den Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, die in „Spektroskopie der Röntgenstrahlen" von M. Siegbahn ausführlich besprochen werden. Das wesentlichste Ergebnis der genannten Untersuchungen läßt sich durch die Formel

$$J = C\,(V - V_0)^n$$

darstellen, wo J die Intensität, C eine Konstante, V die Röhrenspannung, V_0 die Anregungsspannung bedeutet und n zwischen 1,7 und 2 liegt.

Tabelle 2.

Linie	92 U Allison	90 Th Allison	78 Pt Jönsson	74 W Jönsson	73 Ta Hicks	47 Ag Jönsson	46 Pd Jönsson	45 Rh Jönsson	42 Mo Jönsson
l	2,4	3,6	3,4	3,2	3,6	4,1	3,4	—	—
η	1	1,8	1,5	1,3	1,2	2,2	2	—	—
α_1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
α_2	11	12	11,4	11,5	11	12	12	13	13
β_1	49,4	62	50,8	51,8	57	59	59	61	62
β_2	28	26	22,7	20	20	21	13	13	8
β_3	4,2	3,3	8,3	8,2	7,4	9,4	10	12,1	14,2
β_4	4,1	—	5,2	5,2	6,4	5,8	6,4	7,9	9,9
β_5	6,4	—	—	0,2	0,5	—	—	—	—
β_6	1,6	1,4	1,5	1	—	—	—	—	—
β_7	0,4	0,45	—	—	0,4	—	—	—	—
β_9	—	—	—	0,7	0,4	—	—	—	—
β_{10}	—	—	—	0,7	—	—	—	—	—
γ_1	12	14	11,1	9,1	11	12	8,5	7,7	6,8
γ_2	1,5	1,5	—	1,48	2	—	—	—	—
γ_3	1,4	5,3	—	2,01	2,7	—	—	—	—
γ_4	—	—	—	0,59	0,8	—	—	—	—
γ_5	—	—	—	0,41	0,6	—	—	—	—
γ_6	2,2	—	—	0,3	0,2	—	—	—	—

Tabelle 3.

Dublett	Burger-Dorgelo Regel	92 U	90 Th	78 Pt	74 W				73 Ta
		Allison	Allison	Jönsson	Duane und Patterson	Allison	Jönsson	Nishina und Ray	Hicks
$\alpha_1:\alpha_2:\beta_1$	9:1:5	9:1:4,4	9:1,1:5,6	9:1:4,6	10:1:—	10:1:—	9:1:4,7	10:1:4,3	9:0,9:5,1
$1:\eta$	2:1	2:0,92	2:1	2:0,88	—	—	2:0,81	—	2:0,67
$\beta_2:\gamma_1$	2:1	2:0,86	2:1,06	2:0,98	—	—	2:0,91	—	2:1,1
$\beta_6:\gamma_5$	2:1	—	—	—	—	—	2:0,82	—	—
$\beta_3:\beta_4$	2:1	2:1,96	—	—	2:1	2:1,02	2:1,27	—	2:1,73
$\gamma_3:\gamma_2$	2:1	2:2,14	—	—	2:1,6	2:1,26	2:1,48	—	2:1,48

II. Ziel der vorliegenden Arbeit.

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, festzustellen, in welchem Maße das Intensitätsverhältnis der Röntgenlinien, die bei Anregung mit Röntgenstrahlen erhalten werden, von der Röhrenspannung abhängt, eine Frage, die sowohl theoretisches als auch rein praktisches Interesse hat.

Daß nicht nur die Intensität der Linien, sondern auch das Intensitätsverhältnis in vielen Fällen spannungsabhängig sein wird, ließ sich bereits nach den Erfahrungen von Robinson[1]), Skinner[2]) und Hevesy und Alexander[3]) voraussehen. Bei seinen Untersuchungen über von Röntgenstrahlen ausgelöste Photoelektronen fand Robinson, daß das Verhältnis der Zahl der Photoelektronen, die von zwei verschiedenen Niveaus eines Elements ausgesandt werden, von der auslösenden Wel-

[1]) H. R. Robinson, Proc. Roy. Soc. 104, 445 (1923); vgl. auch H. R. Robinson und C. L. Young, Proc. Roy. Soc. 128, 92 (1930).

[2]) H. W. Skinner, Proc. Cambridge Phil. Soc. 22, 39 (1925).

[3]) G. v. Hevesy und E. Alexander, Nature 129, 315 (1932). E. Alexander, Z. S. Phys. 75, 391 (1932).

lenlänge abhängt. Aus diesem Befund folgt offenbar, daß das Verhältnis der Absorption des L_I-Niveaus zu der des L_{III}-Niveaus wellenlängenabhängig ist. Da nun die Absorption die Vorbedingung der Emission der charakteristischen Linien aus den betreffenden Niveaus ist, mußte gefolgert werden, daß auch das Intensitätsverhältnis der entsprechenden Emissionslinien eine Wellenlängenabhängigkeit aufweisen wird. Diese Folgerung wurde durch qualitative Versuche von Skinner und durch quantitative Versuche von Hevesy und Alexander bestätigt.

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Intensitätsverhältnis $\alpha_1:\alpha_2$, $\beta_1:\alpha_1$, $\beta_1:\alpha_2$, $\beta_2:\alpha_1$, $\beta_2:\alpha_2$, $\beta_1:\beta_2$ sowie das einiger anderer Linien in Abhängigkeit von der Röhrenspannung bei den Elementen Wolfram, Thallium und Uran untersucht. Es wurde mit der Bremsstrahlung des Wolframs angeregt. Bei einer solchen Anregung wirkt ein weites Wellenlängengebiet anregend, doch in erster Linie Frequenzen, die zwischen der Anregungsfrequenz und deren etwa anderthalbfachem Wert liegen. Denn der sehr harte Anteil des Bremsspektrums kommt für die Anregung praktisch nicht mehr in Betracht. Die anregenden Strahlen werden im letzten Falle nämlich größtenteils in einer solchen Tiefe absorbiert, daß die erregte Sekundärstrahlung nicht mehr auszutreten vermag.

III. Versuchsanordnung.

Der Spektrograph, der für diese Untersuchung benützt wurde, war in diesem Institut konstruiert worden[1]).

Das verwendete Röntgenrohr ist von Alexander und Faeßler[2]) angegeben.

Der von einem Hochspannungstransformator gelieferte Wechselstrom wurde durch die vier Ventile in Graetzscher Schaltung gleichgerichtet und seine Welligkeit durch zwei der Röhre parallel geschaltete Kondensatoren von einer Kapazität von insgesamt 0,2 mF auf ein vernachlässigbares Maß heruntergedrückt. Unter Spannung lag die Anode; die Kathode war geerdet.

[1]) E. Alexander, ZS. f. Phys. 83, 512 (1923).

[2]) E. Alexander und A. Faeßler, ZS. f. Phys. 68, 260 (1931).

IV. Durchführung des Versuchs.

Die Belichtung des Filmes erfolgte nach genauer Einstellung von Spannung und Stromstärke, während der Kristall gleichmäßig über den passenden Winkelbereich gedreht wurde. Besondere Sorgfalt wurde auf die Entwicklung des Filmes verwendet. Jeder Film (doppelseitig begossener Laue-Film) wurde bei einer konstanten Temperatur von 18° C in frischem Entwickler entwickelt. Der Film stand senkrecht im Entwickler und wurde fortwährend bewegt. Um die Temperatur während der Entwicklungszeit konstant zu halten, befand sich der Entwicklungsbecher im Thermostaten, der auf 18° gehalten wurde. Die Entwicklungszeit betrug 4 Minuten.

Zur Photometrierung der Filme wurde ein Koch-Goos'sches Mikrophotometer[1]) benutzt. Der Untergrund wurde zu beiden Seiten jeder Linie gemessen und aus diesen beiden Messungen der Mittelwert gebildet. Die Linien wurden langsam über den im Photometerdiaphragma sich befindenden Spalt bewegt und die maximale Ablesung auf der Elektrometerskala als Maß der Schwärzung der betreffenden Linie genommen. Jede Linie wurde in dieser Weise an sechs verschiedenen Stellen ausgemessen; von den sechs Ablesungen wurde der Mittelwert gebildet. Von diesem Wert wurde die Schwärzung des Untergrundes abgezogen.

Eine andere genauere Methode der Photometrierung besteht darin, daß man die Flächen vergleicht, welche die Photometerkurven einschließen. Es zeigte sich jedoch, daß beim Vergleich von zwei L-Linien beide Methoden dasselbe Ergebnis liefern.

Der Vergleich der sehr intensiven α_1-Linie mit anderen Linien machte zunächst Schwierigkeiten, die folgendermaßen behoben wurden. Bei jeder Spannung wurden drei oder vier Filme bei verschiedenen Belichtungszeiten belichtet. Nach dem Photometrieren der Filme wurde in einem Diagramm die Belichtungszeit als Funktion der Elektrometerfadenausschläge aufgetragen. Falls die Kurve eine Abweichung von einer geraden Linie zeigte — und dies war meistens der Fall — wurde eine aus der Fig. 1 er-

[1]) Siehe z. B.: F. Goos und P. P. Koch, ZS. f. Phys. 44, 855 (1927).

sichtliche graphische Interpolation vorgenommen. Tabelle 4 zeigt die nach verschiedenen Zeiten erhaltenen Schwärzungen für die Linien $L\alpha_1$ und $L\alpha_2$ des Elements 81 Tl bei einer Spannung von 33 kV und einer Stromstärke von 40 mA. In Figur 1a und 1b sind die Daten graphisch dargestellt.

Tabelle 4.

Belichtungszeit in Stunden	Schwärzung						Intensitätsverhältnis $\frac{a_1}{a_2}$
	Gesamtschwärzung		Nach Abzug der Untergrundschwärzung		Nach Abzug der Untergrundschwärzung und der Vornahme d. graphischen Interpolation		
	1	2	1	2	1	2	
0,25	41,4	18,7	23,0	4,7	23,0	4,7	5,10
0,5	65,0	22,0	49,2	6,2	49,2	6,2	7,94
0,75	81,4	23,3	67,0	8,9	72,0	8,9	8,08
1	95,8	27,8	81,3	13,3	96,0	13,3	7,22
2	129	38,2	114	23,5	182	23,5	7,74

Abhängigkeit der Photometer-Ablesung von der Belichtungszeit.

Stromstärke 40 mA

Fig. 1a

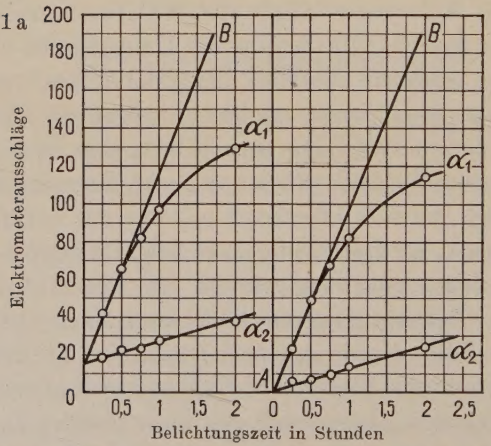


Fig. 1b

Figur 1a gibt die Schwärzung mit dem Untergrund u. Figur 1b die Schwärzung ohne den Untergrund. Die geraden Linien A B zeigen die Größe des Elektrometerausschlages, der beim Vergleich von Linienintensitäten zu berücksichtigen ist.

Wie ersichtlich, gibt diese Methode bei jeder Belichtungszeit, abgesehen von sehr kurzen Belichtungszeiten, übereinstimmende Resultate.

V. Versuchsergebnisse.

a) Wolfram (74).

Es wurden die Intensitätsverhältnisse der folgenden fünf Linien gemessen, die die stärksten Linien der drei Erregungsstufen umfassen.

Niveau[1])	Linien
L_I	β_3
L_{II}	β_1
L_{III}	α_1, α_2, β_2.

Die Versuchsspannungen betrugen 18, 23, 28, 32, 36,5, 40 und 45 kV. Der Sekundärstrahler war ein 1 mm starkes Wolframblech.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde die Absorption der Strahlen in der 5,5 μ dicken Aluminiumfolie, welche den Spalt bedeckte, berücksichtigt. Da im Spektrograph ein Druck von ungefähr 0,5 cm herrschte, konnte die Absorption der Strahlen in der Luft des Spektrographen vernachlässigt werden. Die Berechnung der Korrektion erfolgt nach der bekannten Formel

$$I = I_0 \, e^{-\mu d}.$$

Die experimentell gefundenen Werte sind mit den so erhaltenen Absorptionsfaktoren zu multiplizieren. Ferner mußten zwei weitere Korrektionen angebracht werden, von denen die eine die Absorption im Cellophanfenster berücksichtigte, das den Spektrographen von der Röhre trennte, die andere die Wellenlängenabhängigkeit der photographischen Wirksamkeit der Strahlung. Bei der Anbringung dieser Korrektion verwendete ich die mir von Herrn H. Lay freundlichst zur Verfügung gestellten Angaben.[2])

Außer den genannten Korrektionen muß noch berücksichtigt werden, daß die härteren Strahlen aus dem Strahlungskörper

[1]) Die Nomenklatur, die in dieser Arbeit benutzt wird, ist diejenige von Siegbahn.

[2]) Vgl. die demnächst erscheinende Dissertation von H. Lay.

Tabelle 5. Intensitäten der Wolfram L-Linien. Stromstärke 20 mA.

Spannung kV	Belichtungszeit in Stunden	Intensitäten															
		α_2			α_1			β_1			β_3			β_2		
		Experimentelle Werte	Nach graphischer Interpolation	Mit Korrektionen	Experimentelle Werte	Nach graphischer Interpolation	Mit Korrektionen	Experimentelle Werte	Nach graphischer Interpolation	Mit Korrektionen	Experimentelle Werte	Nach graphischer Interpolation	Mit Korrektionen	Experimentelle Werte	Nach graphischer Interpolation	Mit Korrektionen
18	2,0	3,20	3,20	9,55	23,8	23,8	72,7	6,90	6,90	26,8	—	—	—	3,80	3,80	15,5
	3,5	5,00	5,00	14,9	41,5	41,5	127	11,9	11,9	45,9	—	—	—	6,70	6,70	27,4
	5,0	7,00	7,00	20,9	56,8	58,8	180	16,8	16,8	64,9	1,80	1,80	7,16	9,80	9,80	40,1
23	1,0	4,50	4,50	13,4	37,2	37,2	114	13,6	13,6	52,3	—	—	—	6,10	6,10	24,9
	1,5	7,00	7,00	20,9	55,5	55,5	170	21,0	21,0	81,0	2,40	2,40	9.55	9,60	9,60	39,3
	2,0	9,00	9,00	26,8	69,3	74,5	228	28,7	28,7	111	3,00	3,00	11,9	12,1	12,1	49,4
	2,5	11,3	11,3	33,7	81,2	93,0	284	35,1	35,1	136	3,70	3,70	14,7	15,2	15,2	62,3
28	0,85	5,70	5,70	17,0	47,0	47,0	144	19,8	19,8	76,6	—	—	—	7,8	7,8	31,9
	1,0	7,50	7,50	22,3	56,3	56,3	173	24,0	24,0	92,8	2,40	2,40	9,56	9,5	9,5	38,8
	1,25	9,30	9,30	27,6	70,7	70,7	216	31,3	31,3	121	3,30	3,30	13,2	12,7	12,7	51,7
	1,65	11,7	11,7	34,8	83,6	92,4	282	40,1	40,1	155	4,70	4,70	18,7	15,6	15,6	63,8
32	0,5	5,20	5,20	15,5	42,8	42,8	131	19,6	19,6	75,8	2,20	2,20	8,76	7,50	7,50	30,7
	1,0	11,0	11,0	32,9	81,0	85,0	260	38,6	38,6	149	4,50	4,50	17,9	14,0	14,0	57,2
	1,15	13,0	13,0	38,6	88,7	98,3	301	43,5	43,5	168	4,70	4,70	18,7	16,4	16,4	67,0
	1,25	13,7	13,7	40,8	93,9	107	327	49,3	49,3	191	4,90	4,90	19,5	17,1	17,1	69,7
36,5	0,5	5,70	5,70	17,0	42,8	42,8	131	20,3	20,3	74,8	—	—	—	7,90	7,90	32,3
	0,75	7,60	7,60	22,7	64,5	64,5	197	30,2	30,2	117	3,30	3,30	13,0	10,8	10,8	44,0
	1,0	10,9	10,9	32,5	78,1	85,8	263	39,1	39,1	151	4,30	4,30	17,1	14,8	14,8	60,3
	1,25	13,7	13,7	40,8	88,4	108	329	49,5	49,5	191	5,40	5,40	21,5	17,5	17,5	71,6
40	0,25	—	—	—	38,9	38,9	119	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,5	9,30	9,30	27,7	71,7	75,6	232	34,8	34,8	135	3,90	3,90	15,5	12,2	12,2	49,8
	0,7	12,9	12,9	38,4	92,2	103,6	317	47,5	47,5	183	5,30	5,30	21,0	17,0	17,0	69,3
	0,85	16,2	16,2	48,1	103,4	128,5	392	57,5	57,5	222	6,30	6,30	25,0	20,6	20,6	84,1
45	0,5	7,30	7,30	21,8	58,3	58,3	178	27,1	27,1	105	3,00	3,00	11,9	9,60	9,60	39,3
	1,0	14,7	14,7	43,8	95,3	116	355	53,1	53,1	205	5,90	5,90	23,4	19,0	19,0	77,5

ungehinderter austreten als die weichen Strahlen, wodurch die ersteren bevorzugt werden. Diese Korrektion für die Tiefenabsorption beträgt im Falle der genannten Linien des Wolframs im ungünstigsten Falle nur 12%, beim schweren Uran dagegen (siehe S. 22) erreicht ihr Wert bereits 60%. Dieser Korrektion kommt eine besondere Bedeutung zu beim Vergleich der mit Röntgenstrahlen und der mit Kathodenstrahlen erregten Linien. Im letzteren Falle werden ja die Linien in einer sehr dünnen obersten Schicht des Strahlers erzeugt, wodurch die Notwendigkeit des Anbringens einer Tiefenkorrektion fortfällt. Nicht so bei der Erregung mit Röntgenstrahlen. Beim Fortlassen der genannten Korrektion wird deshalb bei Anregung mit Röntgenstrahlen eine zu große Intensität der härteren Linie vorgetäuscht.

Tabelle 5 gibt die photometrisch ermittelten Linienintensitäten, auch sieht man hier die Intensitäten nach graphischer Interpolation und dem Anbringen der Korrektion.

Der nächste Schritt war der Vergleich der Linienintensitäten. Die drei β-Linien wurden untereinander und mit den Linien α_2 und α_1 verglichen. Schließlich wurde das Intensitätsverhältnis des Dubletts $\alpha_1 : \alpha_2$ bestimmt (Tab. 6 und 7).

Tabelle 6.

Intensitätsverhältnis der Wolfram L-Linien.

Spannung kV.	Belichtungszeit i. Std.	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\beta_2}$ $\frac{L_I}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_2}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_2}$ $\frac{L_I}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_1}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_1}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_1}$ $\frac{L_I}{L_{III}}$
18	2,0	7,60	1,73	—	2,81	1,62	—	0,368	0,213	—
	3,5	8,52	1,67	—	3,08	1,84	—	0,361	0,216	—
	5,0	8,60	1,61	0,178	3,10	1,92	0,343	0,360	0,223	0,0398
23	1,0	8,50	2,02	—	3,91	1,86	—	0,458	0,218	—
	1,5	8,13	2,06	0,243	3,87	1,88	0,456	0,476	0,231	0,0561
	2,0	8,50	2,25	0,241	4,15	1,84	0,444	0,486	0,216	0,0521
	2,5	8,42	2,18	0,236	4,04	1,85	0,436	0,478	0,219	0,0517

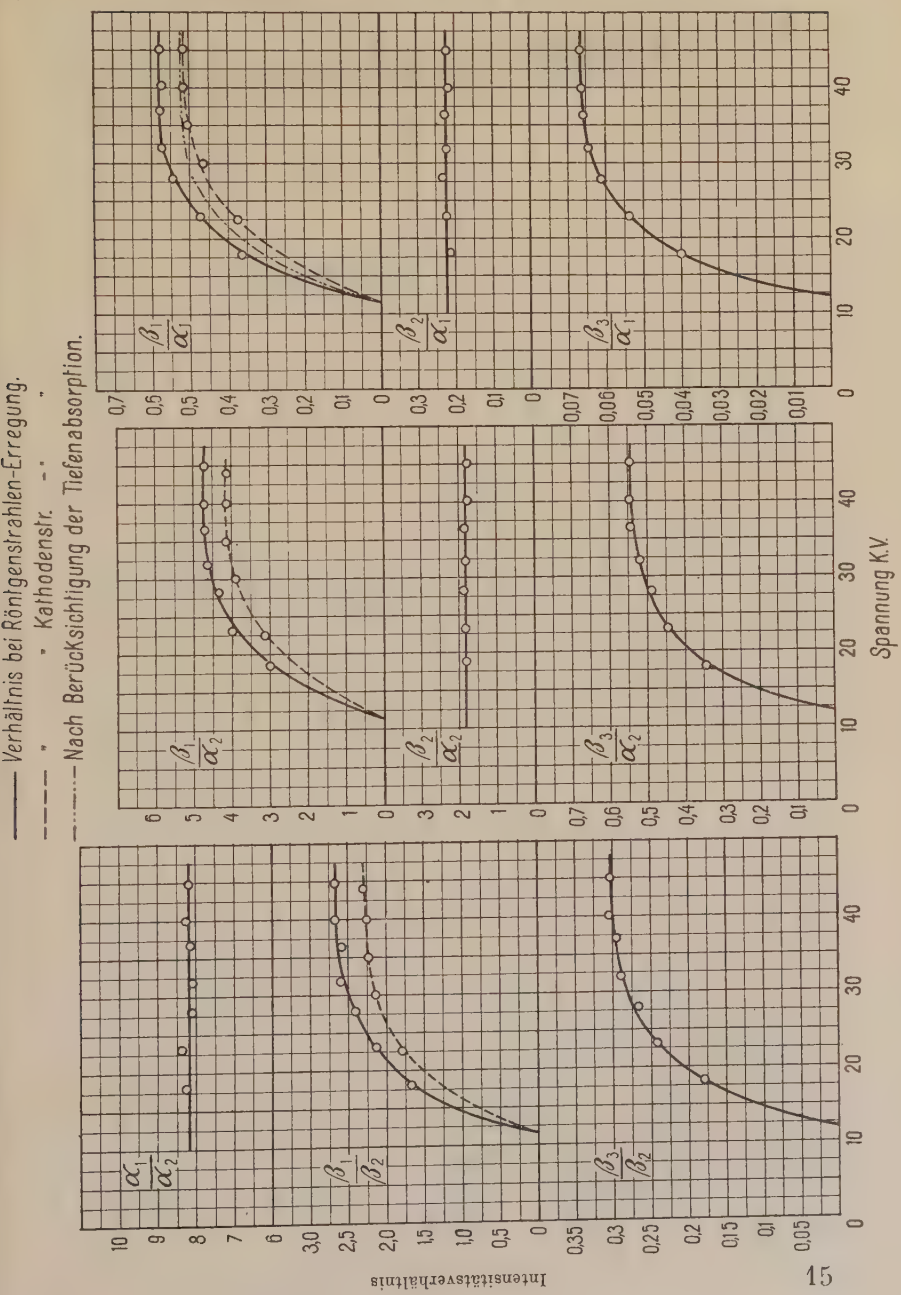
Spannung kV.	Belichtungszeit in Std.	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\beta_2}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_3}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_2}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_1}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_1}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_1}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$
28	0,85	8,46	2,40	—	4,50	1,88	—	0,531	0,222	—
	1,0	7,75	2,39	0,246	4,15	1,74	0,428	0,535	0,224	0,0552
	1,25	7,82	2,34	0,255	4,38	1,87	0,478	0,560	0,239	0,0610
	1,65	8,10	2,43	0,293	4,45	1,83	0,537	0,549	0,226	0,0663
32	0,5	8,45	2,47	0,285	4,89	1,98	0,565	0,579	0,234	0,0668
	1,0	7,90	2,60	0,313	4,52	1,73	0,544	0,572	0,220	0,0688
	1,15	7,80	2,51	0,279	4,35	1,74	0,484	0,558	0,223	0,0620
	1,25	8,01	2,74	0,279	4,67	1,71	0,477	0,584	0,213	0,0596
36,5	0,5	7,70	2,42	—	4,30	1,90	—	0,570	0,246	—
	0,75	8,66	2,64	0,296	5,15	1,94	0,572	0,593	0,223	0,0660
	1,0	8,06	2,50	0,284	4,63	1,85	0,527	0,573	0,229	0,0649
	1,25	8,06	2,66	0,300	4,68	1,75	0,527	0,580	0,217	0,0653
40	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,5	8,37	2,71	0,311	4,87	1,79	0,560	0,582	0,215	0,0667
	0,7	8,25	2,64	0,303	4,76	1,80	0,546	0,576	0,218	0,0661
	0,85	8,14	2,64	0,297	4,60	1,75	0,519	0,566	0,214	0,0636
45	0,5	8,16	2,67	0,303	4,81	1,80	0,546	0,590	0,221	0,0668
	1,0	8,11	2,65	0,302	4,68	1,77	0,535	0,577	0,219	0,0658

Tabelle 7.

Intensitätsverhältnis der Wolfram L-Linien

Spannung kV.	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\beta_2}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_2}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_2}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_2}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_1}$ $\frac{L_{II}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_1}$ $\frac{L_{III}}{L_{III}}$	$\frac{\beta_3}{\alpha_1}$ $\frac{L_{I}}{L_{III}}$
18	8,24	1,67	0,178	3,00	1,79	0,343	0,363	0,217	0,0398
23	8,39	2,13	0,240	3,99	1,86	0,445	0,474	0,221	0,0533
28	8,03	2,39	0,265	4,37	1,83	0,481	0,544	0,231	0,0608
32	8,04	2,58	0,289	4,61	1,79	0,518	0,573	0,222	0,0643
36,5	8,12	2,55	0,294	4,69	1,86	0,542	0,579	0,229	0,0654
40	8,25	2,66	0,304	4,74	1,78	0,541	0,575	0,216	0,0655
45	8,14	2,66	0,303	4,74	1,79	0,541	0,583	0,220	0,0663

Figur 2. **Intensitätsverhältnisse der Wolfram L-Linien.**



Das Verhältnis der Intensitäten der α_2, α_1 und β_2-Linien zeigt sich spannungsunabhängig. Es handelt sich hier um Linien, die demselben Niveau entstammen und bei denen eine Spannungsabhängigkeit auch nicht zu erwarten ist. Anders bei den übrigen untersuchten Linien. Hier ändert sich das Intensitätsverhältnis stark mit der Spannung und erreicht erst bei dem 3—4 fachen der Anregungsspannung einen konstanten Wert. Überzeugte man sich, daß die letzterwähnte Röhrenspannung überschritten ist, so erübrigt sich jede weitere Spannungskontrolle.

Die Erklärung der Spannungsabhängigkeit des Intensitätsverhältnisses ist die folgende: Bei höherer Röhrenspannung bzw. höherer Frequenz der anregenden Strahlung erfolgt eine bevorzugte Absorption in der stärker gebundenen Elektronengruppe, nämlich in der L_{II} bzw. L_I-Gruppe der L_{III}-Gruppe gegenüber. Auf Grund seiner Erfahrungen über die Intensität der Emission der Photoelektronen hat H. R. Robinson die Vermutung geäußert, daß die von Hevesy und Alexander gefundene Änderung des Intensitätsverhältnisses zu groß sei. Die letzteren fanden nämlich, daß das Intensitätsverhältnis Ag $L\beta_2$:Ag $L\beta_3$ eine 2,4 fache Veränderung erleidet, wenn die Röhrenspannung von 8 kV auf 22 kV steigt bzw. die anregende Wellenlänge von 2,6 A.E. auf 1,3 A.E. sinkt. Wie aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung hervorgeht, ist dieser Zweifel unberechtigt, da vom Verfasser im Falle des Wolframs festgestellt worden ist, daß das Intensitätsverhältnis je nach der anregenden Spannung sogar zwischen 1 und 3 schwankt.

Um festzustellen, ob die Intensitätsverhältnisse bei Kathodenstrahlerregung eine ähnliche Spannungsabhängigkeit zeigen wie bei Röntgenstrahlenerregung, wurden auch einige Intensitätsmessungen mit Kathodenstrahlerregung ausgeführt; alle andern Bedingungen wurden genau wie oben beschrieben eingehalten. Die Intensitäten der Linien werden in Tabelle 8 angegeben, während Tabelle 9 die Intensitätsverhältnisse wiedergibt. Endlich zeigt Tabelle 10 die Mittelwerte der Intensitätsverhältnisse. (Bei diesen Messungen war die β_3-Linie zu schwach, um genügend genaue Resultate zu geben.)

Die Kurven, welche die Abhängigkeit der Intensitätsverhältnisse von der Spannung bei Kathodenstrahlerregung zeigen, sind in Figur 2 wiedergegeben. Man sieht, daß der Verlauf der Kurven praktisch derselbe ist, ob die Erregung mit Kathodenstrahlen oder mit Röntgenstrahlen erfolgt ist.

Tabelle 8.
Intensitäten der Wolfram L-Linien.
(Mit Kathodenstrahlen erregt.)

Spannung kV.	Intensität							
	α_2		α_1		β_1		β_2	
	Experim. Werte	Korrig.	Experim. Werte	Korrig.	Experim. Werte	Korrig.	Experim. Werte	Korrig.
22,5	5,10	15,0	41,9	128	12,4	47,9	6,60	27,0
30,0	4,30	12,7	33,5	103	12,3	47,5	5,20	21,3
	5,30	15,6	44,2	135	16,4	63,3	7,70	31,5
35,0	3,90	11,5	30,4	93,0	12,4	47,9	5,30	21,7
	5,60	16,5	45,2	138	17,7	68,3	7,60	31,1
40,0	—	—	—	—	—	—	—	—
	3,60	10,6	28,1	86,0	11,5	44,4	4,80	19,6
44,0	3,30	9,7	26,3	80,3	10,2	39,4	4,30	17,6
	3,70	10,9	26,2	80,2	11,4	44,0	4,60	18,8

Tabelle 9.
Intensitätsverhältnisse der Wolfram L-Linien.
(Mit Kathodenstrahlen erregt).

Spannung kV.	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_1}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_1}$
22,5	8,52	1,77	3,19	1,80	0,374	0,211
30,0	8,10	2,23	3,74	1,68	0,460	0,207
	8,64	2,01	4,06	2,02	0,469	0,233
35,0	8,09	2,21	4,16	1,88	0,515	0,233
	8,35	2,20	4,14	1,88	0,495	0,225
40,0	8,11	2,26	4,19	1,85	0,517	0,228
44,0	8,26	2,24	4,06	1,83	0,490	0,219
	7,36	2,34	4,03	1,72	0,548	0,234

Tabelle 10.

Intensitätsverhältnisse der Wolfram L-Linien.

(Mit Kathodenstrahlen erregt).

Spannung kV.	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_2}$	$\frac{\beta_1}{\alpha_1}$	$\frac{\beta_2}{\alpha_1}$
22,5	8,52	1,77	3,19	1,82	0,374	0,211
30,0	8,37	2,12	3,90	1,85	0,465	0,220
35,0	8,22	2,20	4,15	1,88	0,505	0,228
40,0	8,11	2,26	4,19	1,85	0,517	0,228
44,0	7,81	2,29	4,05	1,78	0,519	0,226
	8,21			1,84		0,223

Beim Vergleich der Intensitäten wurde der Vorschlag gemacht, die zu vergleichenden Linien durch die vierte Potenz der Schwingungszahl zu dividieren. Bringen wir diese der sogenannten ν^4-Beziehung entsprechende Korrektion an unseren Werten an, so erhalten wir die aus Tabelle 12 ersichtlichen Werte. Dieselbe Tabelle enthält auch die Werte, die man erhält, wenn die Abhängigkeit der Intensität der Kristallreflexion vom Reflexionswinkel berücksichtigt wird. Bei der Durchführung der letztgenannten Korrektion wurden die von Allison[1]) festgestellten Werte benützt.

Tabelle 11.

Intensitätsverhältnis der L-Linien des Wolframs.

(Mit Kathodenstrahlen erregt).

Linie	Nach der Burger-Ornstein-Regel	Bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption im Strahlengang	Mit weiterer Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kristallreflexion v. Winkel	Bei weiterer Berücksichtigung der ν^4 Korrektionen
$\alpha_1:\alpha_2:\beta_1$	9:1:5	9:1, 1:4,7	9:1,1:5,1	9:1,1:2,9

[1]) S. K. Allison, Phys. Rev. 41, 1 (1932).

Tabelle 12.

Relative Intensitäten der Wolfram L-Linien.

	Anregung mit Kathodenstrahlen.			Anregung mit Röntgenstrahlen.		
Linie	Bei alleiniger Berücksichtigung d. Absorption im Strahlengang	Bei weiterer Berücksichtigung d. Abhängigkeit d. Kristallreflexion vom Winkel	Bei weiterer Berücksichtigung d. ν^4 Korrektion	Bei alleiniger Berücksichtigung d. Absorption im Strahlengang	Bei Berücksichtigung d. Abhängigkeit d. Kristallreflexion vom Winkel	Bei weiterer Berücksichtigung d. ν^4 Korrektion
l	—	—	—	1,4	1,3	2,2
α_2	12,2	12,1	12,4	12,2	12,1	12,4
α_1	100	100	100	100	100	100
η	—	—	—	0,8	0,8	0,7
β_4	—	—	—	4,1	4,5	2,7
β_6	—	—	—	2,0	2,2	1,3
β_1	51,6	57,0	32,3	58,2	64,2	36,4
β_3	—	—	—	6,6	7,4	4,0
β_2	22,3	25,0	12,6	22,2	24,9	12,5
γ_1	—	—	—	7,1	8,6	2,6
γ_2	—	—	—	0,8	1,0	0,27
γ_3	—	—	—	1,0	1,2	0,32
γ_4	—	—	—	0,6	0,75	0,18

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, zeigt das Linienverhältnis $\alpha_1:\alpha_2:\beta_1$ nach Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kristallreflexion vom Reflexionswinkel eine gute Übereinstimmung mit dem nach Burger und Ornstein berechneten Wert. Nach Anbringen der ν^4 Korrektion wird die Übereinstimmung dagegen schlechter. Dieselbe Erfahrung wurde von Hicks gemacht[1]) bei der Untersuchung der Intensitätsverhältnisse der mit Kathodenstrahlen angeregten Linien des Tantals.

b) Thallium (81).

Beim Thallium wurden dieselben Linien untersucht wie beim Wolfram, nämlich:

[1]) V. Hicks, Phys. Rev. 36, 1273 (1930); 38, 572 (1931).

Niveau.	Linie.
L_I	β_3
L_{II}	β_1
L_{III}	α_2, α_1, β_2.

Es wurde bei den Spannungen 23, 27,5, 32,5, 37,5 und 42 kV gearbeitet. Auch bei Thallium wurden Korrektionen wegen der verschiedenen Photoempfindlichkeit des Filmes bei verschiedenen Wellenlängen und wegen der Absorption in der 5,5 μ-starken Aluminiumfolie angebracht. Da die Thallium-Linien ziemlich hart sind, war es nicht nötig, Korrektionen wegen Absorption im Cellophanfenster anzubringen.

Tabelle 13.

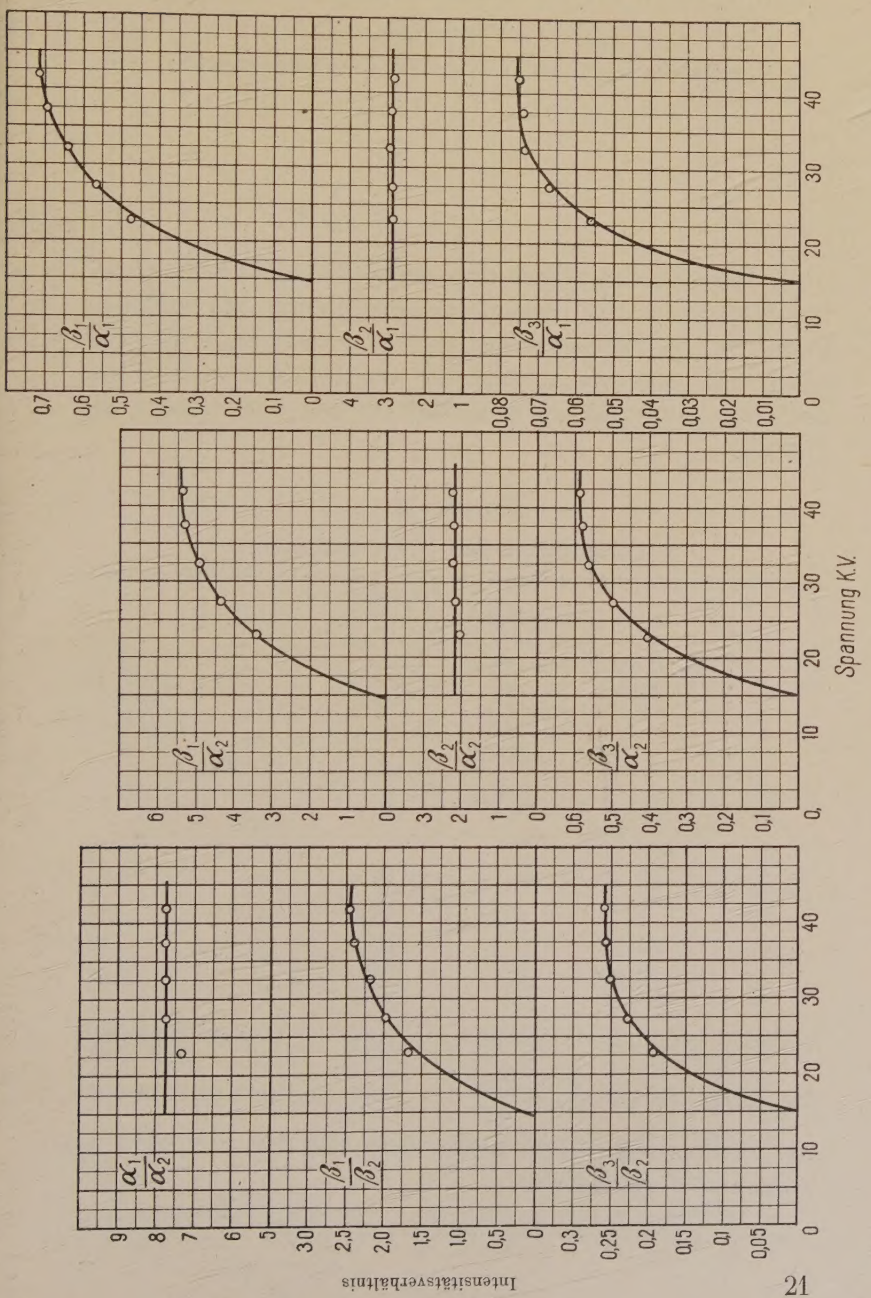
Intensitäten der Thallium L-Linien.

Linie	Bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption im Strahlengang	Bei weiterer Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kristallreflexion v. Winkel	Bei weiterer Berücksichtigung der ν^4-Korrektion
α_2	13	13	13,5
α_1	100	100	100
β_1	71	79	39,4
β_2	28,8	32,0	15,5
β_3	7,6	8,5	4,0

Wie aus Fig. 33 ersichtlich, sind die Kurven für Thallium ganz analog denjenigen für Wolfram. Die Intensitätsverhältnisse der aus demselben Niveau stammenden Röntgenlinien geben, gegen die Spannung aufgetragen, eine gerade horizontale Linie. Die übrigen Intensitätverhältnisse erreichen ihren Grenzwert bei einer Anregungsspannung von ungefähr 45 kV.

Tabelle 13 gibt die maximalen Intensitätsverhältnisse der Linien nach Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kristallreflexion vom Winkel und nach Multiplikation mit ν^4.

Figur 3. **Intensitätsverhältnisse der Thallium L-Linien.**



c) Uran (92).

Es wurden die folgenden Linien des Urans untersucht:

Niveau.	Linie.
L_I	β_4
L_{II}	β_1, γ_1
L_{III}	α_2, α_1, β_2.

Die Anregungsspannungen betrugen 30, 35, 40, 44 und 47,5 kV. Der Sekundärstrahler bestand aus einer Pastille aus geglühtem Uranoxyd. Die Ergebnisse sind aus Fig. 4 und Tabelle 14 zu ersehen. Die Spannungsabhängigkeit des Intensitätsverhältnisses der Linien weist denselben Verlauf auf wie bei Wolfram und Thallium.

Tabelle 14.

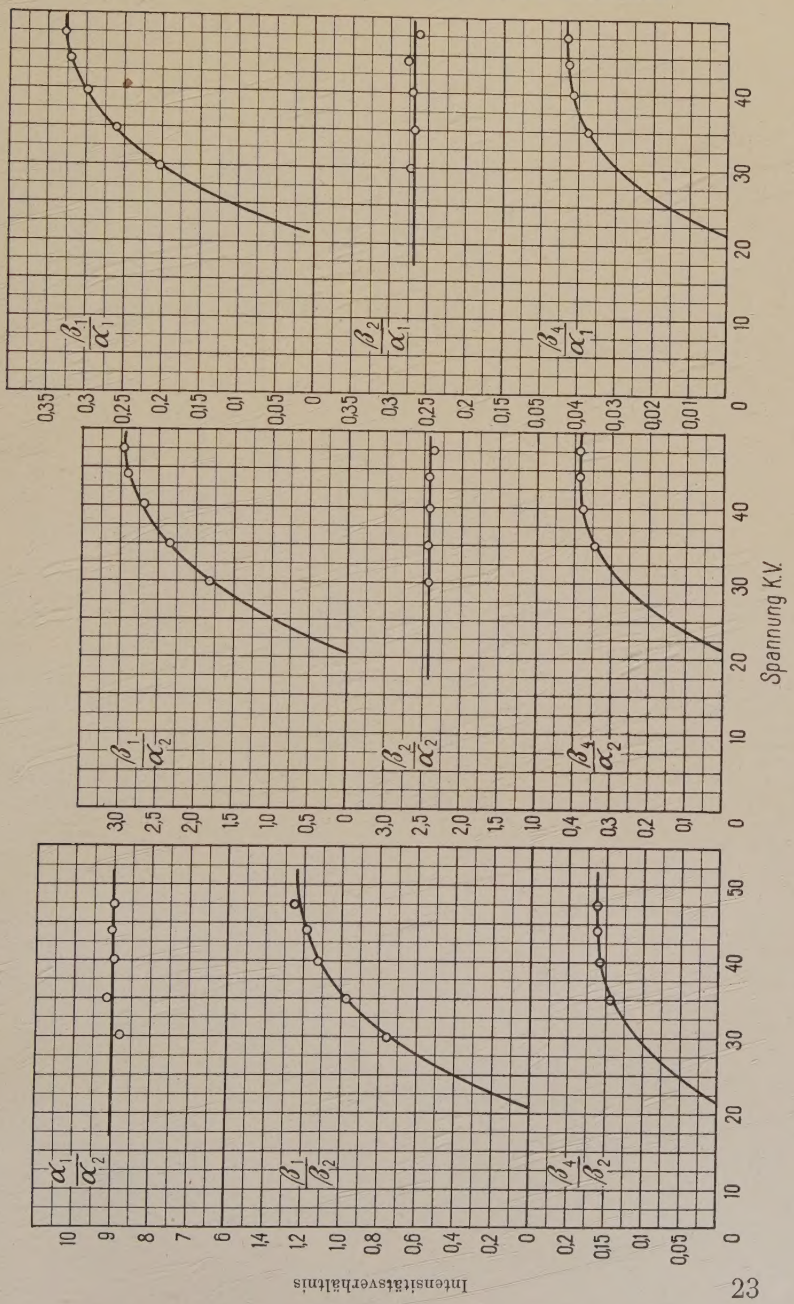
Intensitäten der Uran L-Linien.

Linie	Von Allison erhalten	Bei alleiniger Berücksichtigung der Absorption im Strahlengang	Bei weiterer Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kristallreflexion vom Winkel	Nach weiterer Berücksichtigung der Absorption der Strahlen im Uran	Bei weiterer Berücksichtigung der ν^4 Korrektion
α_2	11	11,1	11,0	11,5	12,1
α_1	100	100	100	100	100
β_2	28	26,8	29,3	18	8,5
β_4	—	4,3	4,8	2,9	1,2
β_1	49,4	33,3	36,8	21,4	8,4
γ_1	10,9	10,5	12,0	9,6	2,0

Vor kurzem hat Stephenson[1]) nach der Ionisationsmethode das Intensitätsverhältnis $\frac{\alpha_{1,2}}{\beta_2}$ von Uran ermittelt und fand den von unserem (6,2) abweichenden Wert von 3,73 nach dem Anbringen aller Korrekturen.

[1]) R. J. Stephenson, Phys. Rev. 43, 527 (1933).

Figur 4. **Intensitätsverhältnisse der Uran L-Linien.**



VI. Zusammenfassung.

1. Es wurde die Spannungsabhängigkeit der Intensitätsverhältnisse der mit Röntgenstrahlen erregten Linien in der L-Serie der Elemente Wolfram, Thallium und Uran untersucht, sowie die des Wolframs bei Anregung mit Kathodenstrahlen.
2. Die Verhältnisse der aus demselben Niveau stammenden Linien sind spannungsunabhängig.
3. Die übrigen Intensitätsverhältnisse sind weitgehend spannungsabhängig; sie erreichen einen Grenzwert bei einer Spannung, die 3—4 mal höher ist als die Erregungsspannung.
4. Das Intensitätsverhältnis der L-Linien ist dasselbe, gleichgültig ob die Erregung mit Röntgenstrahlen oder mit Kathodenstrahlen erfolgt ist.

Die vorliegende Arbeit wurde im physikalisch-chemischen Institut der Universität Freiburg i. Br. ausgeführt.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. G. von Hevesy, bin ich zu großem Dank verpflichtet für sein stets förderndes Interesse während der Ausführung meiner Arbeit. Herrn Dr. E. Alexander danke ich bestens für seine oft gewährte Unterstützung mit Rat und Tat.